

# 국내 생산 강재를 적용한 강합성 거더 휨저항강도의 통계적 특성

## Flexural Resistance Statistics of Composite Plate Girders

신 동 구<sup>1)</sup> · 김 천 용<sup>2)</sup> · 노 준 식<sup>3)</sup> · 박 영 석<sup>4)</sup>  
*Shin, Dong Ku Kim, Chun Yong Rho, Joon Sik Park, Young Suk*

요약 : 국내 LRFD 도로교설계규정의 휨에 대한 재료 저항계수 정립 시 기초 통계자료로 활용하기 위하여 국산 강재를 적용한 강합성 플레이트 거더 단면의 정모멘트 및 부모멘트 하 휨저항강도를 통계적으로 분석하였다. 최근 국내에서 생산된 16,000여 표본의 구조용 강재와 철근에 대한 항복강도와 인장강도 등의 기계적 특성을 통계적으로 분석하여, 공칭강도에 대한 편심계수(bias factor)와 변동계수(coefficient of variation)를 구하였다. 이들 국산 강재와 철근을 적용하여 정·부모멘트를 받는 도로교 강합성 플레이트 거더에 대표단면에 대한 재료 비선형 소성해석을 수행하였으며, 해석결과로부터 모멘트-곡률 곡선을 구하고 단면의 휨저항강도를 산정하였다. 공칭휨강도와 극한휨저항강도를 비교하고 대표적 강합성 단면에 대한 편심계수와 변동계수 통계치를 제시하였다.

ABSTRACT : The objective of the present study is to provide statistical resistance statistics for steel-concrete composite plate girder sections under positive and negative moments. Statistical properties on yield strength, tensile strength, elongation, and fracture toughness of domestic structural steel products, gathered from an analysis of over 16,000 samples, were evaluated. Using the steel samples for the plate girder, the bias factor and the coefficient of variation of the ultimate flexural resistance for representative composite plate girder sections under positive and negative flexures were presented. In calculating the ultimate flexural resistance of the composite section, the moment curvature relationships were developed using the incremental load approach considering material nonlinearity for the steel girder. The predicted statistics can be used in the future for the efficient calibration of LRFD code.

핵심용어 : 극한휨저항강도, 강합성단면, 하중저항계수설계법, 편심계수, 변동계수

KEYWORDS : flexural resistance, composite section, LRFD method, bias factor, coefficient of variation

### 1. 서론

신뢰도기반의 국내 LRFD 도로교설계기준을 제정하기 위해서는 하중계수와 함께 재료저항계수를 국내 통계자료에 근거하여 결정해야 한다. 이들 설계계수는 측정이나 해석을 통한 충분한 분량의 하중관련 및 재료관련 각종 통계자료의 확보가 선행되어야 하고 이를 근거로 적정 목표신뢰도지수에 대한 이들 계수의 보정(calibration) 절차를 수행해야 한다. 저항계수 및 하중계수는 신뢰도기법을 적용하여 보정하며 이를 위해서는 하중과 재료에 대한 편심계수와 변동계수가 필수적으로 이용된다. 미국 AASHTO-LRFD(1996) 설계기준의 기초인 신뢰도기반 캐나다 온타리오 설계기준(OHBDC 1991)의 경우에는

Kennedy 등(1984)과 Ellingwood 등(1980)의 강재 항복강도 통계에 Monte-Carlo 기법을 적용하여 합성단면 휨저항강도 단순 계산식을 개발하고 이를 적용하여 저항계수를 산정한 후 신뢰도기반 보정 절차를 거쳐 재료 저항계수를 결정한 바 있다(Nowak 1990). 미국 AASHTO-LRFD(1996) 설계기준의 경우에는 자국에서 생산된 강재를 적용하여 다양한 합성 거더 단면에 대한 휨저항강도 통계를 재료 비선형 해석을 통하여 수치적으로 구하였으며(Tabsh 1991) 이를 적용하여 목표 신뢰도지수 및 하중계수와 연계하여 저항계수를 결정하였다(Nowak 1999). AASHTO-LRFD(1996)의 경우 합성단면의 재료 변동치만을 고려한 휨저항강도의 편심계수와 변동계수는 각각 1.07 및 0.075로 산정되었으며, 캐나다 OHBDC

1) 정회원 · 명지대학교 토목환경공학과 교수 · 공학박사(dkshin@mju.ac.kr)

2) 명지대학교 토목환경공학과 석사과정(007sostem@hanmail.net)

3) 명지대학교 토목환경공학과 석사과정(x1004jun@hotmail.net)

4) 교신저자. 정회원 · 명지대학교 토목환경공학과 교수 · 공학박사

(Tel: 031-330-6412, Fax: 031-336-9705, E-mail: pys@mju.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2007년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

(1991)에서는 각각 1.06 및 0.105로 산정되었다.

본 연구에서는 LRFD 보정을 위하여 최근 국내에서 생산된 구조용 강재를 이용하여 도로교 강합성거더교 대표단면에 대한 휨저항강도의 통계적 특성을 분석하였다. 우선 Mill-sheet에 근거한 국산 강재의 기계적 성질에 대한 통계분석을 수행하고 국내에서 생산된 철근의 항복강도에 대한 통계분석을 수행하였다. 국내에서 생산된 강재를 적용한 강거더에 대한 재료 비선형 소성해석을 통하여 정·부모멘트를 받는 강합성 플레이트 거더 단면의 공칭휨강도와 극한휨저항강도를 계산하고, 강합성 거더 단면의 휨저항강도에 대한 편심계수와 변동계수를 산정하였다.

정모멘트를 받는 강합성단면 휨부재는 콘크리트 단면이 먼저 파괴되지 않고 강재 거더의 항복으로 시작되는 연성파괴를 유도하여 충분한 여유성을 갖도록 LRFD 설계기준에는 규정하고 있다(AASHTO 1996). 단면이 이와 같은 연성도를 갖는지의 여부는 강거더의 비선형 소성영역에 대한 반복축차법에 의한 비선형해석을 수행하여 모멘트-곡률 곡선을 구하고 극한휨저항강도를 산정하여 판단해야 된다. 소성해석에서 강거더는 탄성-항복-변형경화가 가능한 응력-변형을 관계를 이용하였으며 콘크리트 재료에 대해서는 CEB(1990) 모델을 적용하였다. 반면 부모멘트를 받는 강합성단면 휨부재의 경우, 콘크리트 바닥판의 하중저항 능력을 무시하고 철근과 강거더만을 고려하고 재료 비선형해석을 수행하여 모멘트-곡률 그래프를 구한 후, 단면의 극한 휨저항강도를 산정하였다. 강거더는 최근 1년 간 국내 철강사에서 생산된 일반구조용 압연강재, 용접구조용 압연강재, 용접구조용 내후성 열간 압연강재 등의 다양한 강종을 사용하였으며, 부모멘트 단면의 경우 콘크리트 바닥판 교축방향 철근으로는 SD300 및 SD400을 적용하였다.

## 2. 국산 강재 및 철근의 기계적 특성 통계

정·부모멘트를 받는 강합성 플레이트 거더 단면의 휨저항강도에 대한 통계적 특성 분석하기에 앞서 국내에서 생산된 구조용 강재의 항복강도 등과 같은 주요 기계적 특성과 SD300 및 SD400 철근의 항복강도 특성에 대한 평균 및 변동계수의 기본 통계 파라미터를 산정하였다.

### 2.1 강재 기계적 특성 통계

LRFD 재료저항계수의 보정을 위하여 국산 구조용 압연강재에 대한 Mill sheet를 확보하여 항복강도, 극한강도, 연신율 및 파괴인성을 통계적으로 분석하였다. 분석대상 강재는 2004년과 2005년에 국내 철강사에서 생산된 일반구조용 압연강재

SS400, 용접구조용 압연강재 SM400(SM400A, SM400B), SM490(SM490A, SM490B, SM490C), SM490Y (SM490YA, SM490YB), SM520(SM520B, SM520C), SM570, 용접구조용 내후성 열간 압연강재 SMA490 (SMA490BP, SMA490BW) 강재로 총 표본수는 16,266개이다. 표 1에는 강종별 항복강도( $f_y$ ), 인장강도( $f_u$ ), 연신율( $e$ ) 및 샐피 충격 흡수에너지(CE)에 대한 평균, 변동계수(COV) 통계분석결과를 요약하였다. 표 1의 공칭항복강도(nominal yield strength) 통계치를 현 도로교설계기준 값을 적용하여 분석한 결과, 항복강도의 평균 편심계수(실제강도/공칭강도)는 1.20, 평균 변동계수는 5.83%로 산정되었으며 확률분포함수는 대수정규분포함수로 분석되었다.

### 2.2 철근 항복강도 통계

부모멘트를 받는 합성단면의 콘크리트 바닥판에 사용되는 SD300 및 SD400 철근에 대한 항복강도 특성을 철근의 직경에 따라 표 2에 나타내었다. 표 2로부터 철근의 직경에 따라 편심계수의 차이가 큰 것을 알 수 있으며 직경이 상대적으로 작은 철근의 편심계수가 큰 것으로 분석되었다. SD300 철근의 평균 편심계수와 변동계수는 각각 1.27 및 3.95%로 계산되었으며, SD400 철근의 경우에는 평균 편심계수와 변동계수가 각각 1.27 및 3.94%로 계산되었다. 결과적으로 철근의 편심계수는 1.27, 변동계수는 3.95%인 것으로 산정되었다.

## 3. 단면 소성해석

정모멘트 및 부모멘트를 받는 강합성 플레이트 거더 단면의 극한휨저항강도는 단면을 구성하는 강재거더의 항복 및 변형경화를 허용하는 재료 비선형 해석을 수행하여 모멘트-곡률 곡선을 구하여 산정하였다. 여기에서는 단면 비선형 소성해석에 적용된 기본 가정과 해석 알고리즘을 간략히 기술하였다.

### 3.1 기본 가정

강합성 단면의 모멘트-곡률 곡선을 구하기 위한 재료 비선형 소성해석 프로그램에 도입된 가정은 다음과 같다.

- (1) 강재는 그림 1과 같은 탄성-항복-변형경화가 가능한 응력-변형을 관계를 갖는다. 기계적 특성 관련 파라미터는 표 3에 요약한 바와 같고  $\epsilon_y$ 는 항복변형율을,  $\epsilon_{ST}$ 는 변형경화가 시작되는 변형율을 각각 나타낸다.

표 1. 강종별 기계적 특성 통계 요약

강 종	두께 (mm)	기계적 성질	표본수	평균	COV (%)
SS400	40 이하	F <sub>y</sub>	427	300.4	7.76
		F <sub>u</sub>	427	442.5	3.66
		e(%)	427	29.9	7.33
	40~100	F <sub>y</sub>	37	269.0	6.19
		F <sub>u</sub>	37	447.4	3.05
		e(%)	37	32.5	11.19
SM400A	40 이하	F <sub>y</sub>	267	308.9	8.62
		F <sub>u</sub>	267	444.3	3.72
		e(%)	267	30.0	7.72
SM400B	40 이하	F <sub>y</sub>	144	293.5	5.35
		F <sub>u</sub>	144	438.9	3.10
		e(%)	144	30.7	6.23
		CE	144	179.4	26.95
SM490A	40 이하	F <sub>y</sub>	6133	380.1	8.52
		F <sub>u</sub>	6133	542.8	3.95
		e(%)	6133	26.0	8.79
	40~100	F <sub>y</sub>	788	388.8	6.43
		F <sub>u</sub>	788	564.1	3.53
		e(%)	788	30.4	7.14
SM490B	40 이하	F <sub>y</sub>	4042	382.7	8.15
		F <sub>u</sub>	4042	540.4	3.26
		e(%)	4042	25.9	8.12
		CE	2411	162.1	35.19
	40~100	F <sub>y</sub>	392	385.9	6.18
		F <sub>u</sub>	392	562.1	3.26
		e(%)	392	30.6	7.58
		CE	392	133.3	34.77
SM490C	40 이하	F <sub>y</sub>	92	384.5	6.07
		F <sub>u</sub>	92	544.3	2.79
		e(%)	92	27.4	8.48
	40~100	CE	92	194.0	28.70
		F <sub>y</sub>	53	392.8	6.19
		F <sub>u</sub>	53	563.8	3.29
SM490 YB	40mm 이하	e(%)	53	30.5	6.68
		CE	53	141.0	35.97
		F <sub>y</sub>	551	426.9	5.85
		F <sub>u</sub>	551	570.9	2.92
	40~75	e(%)	551	24.2	8.82
		CE	406	144.2	37.42
		F <sub>y</sub>	143	392.1	4.42
		F <sub>u</sub>	143	567.2	3.23
75~100	e(%)	143	30.9	7.49	
	CE	143	121.2	34.20	
	F <sub>y</sub>	85	319.3	4.42	
	F <sub>u</sub>	85	554.3	2.66	
SM490 YA	40 이하	e(%)	85	31.1	9.18
		CE	85	135.5	30.50
		F <sub>y</sub>	185	425.2	3.97
		F <sub>u</sub>	185	567.0	2.67
	40~75	e(%)	185	24.5	7.75
		CE	25	391.1	4.02
		F <sub>y</sub>	25	391.1	4.02
		F <sub>u</sub>	25	567.0	3.10
e(%)	25	31.1	6.56		

강 종	두께 (mm)	기계적 성질	표본수	평균	COV (%)
SMA490 BP	40 이하	F <sub>y</sub>	274	437.0	9.65
		F <sub>u</sub>	274	560.5	3.90
		e(%)	274	24.4	11.58
		CE	64	180.1	49.46
SMA490 BW	40 이하	F <sub>y</sub>	581	419.2	4.72
		F <sub>u</sub>	581	529.2	2.65
		e(%)	581	26.0	7.93
SM520B	40 이하	CE	180	235.7	31.24
		F <sub>y</sub>	1571	432.1	5.29
		F <sub>u</sub>	1571	578.7	3.05
		e(%)	1571	24.2	8.31
SM520C	40~75	CE	1571	148.6	31.70
		F <sub>y</sub>	24	392.8	2.58
		F <sub>u</sub>	24	574.0	2.37
		e(%)	24	29.8	6.56
SM520C	40 이하	CE	24	139.6	44.90
		F <sub>y</sub>	243	423.0	4.35
		F <sub>u</sub>	243	570.8	2.93
		e(%)	243	25.3	8.45
	40~75	CE	226	150.0	30.95
		F <sub>y</sub>	41	387.3	5.14
		F <sub>u</sub>	41	557.1	4.59
		e(%)	41	33.7	9.92
	75~100	CE	41	178.3	43.93
		F <sub>y</sub>	27	387.6	7.05
		F <sub>u</sub>	27	559.2	4.10
		e(%)	27	32.2	12.96
SM570	40 이하	CE	27	163.2	43.52
		F <sub>y</sub>	92	531.5	6.25
		F <sub>u</sub>	92	632.6	3.83
		e(%)	92	30.3	11.97
	40~75	CE	92	271.2	10.96
		F <sub>y</sub>	49	502.7	5.61
		F <sub>u</sub>	49	616.5	3.49
		e(%)	49	29.8	7.79
CE	49	263.3	10.70		

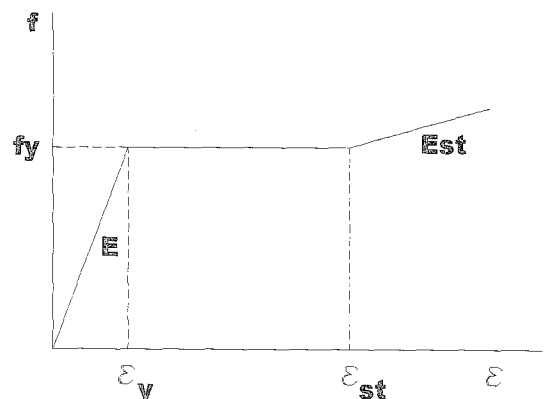


그림 1. 강재의 이상화된 응력-변형률 곡선

표 2. 철근의 항복강도 통계

철근 종류	직경	표본수	항복강도(MPa)			
			공칭값	평균	COV(%)	편심계수
SD300	D10	18	300	447.7	2.97	1.49
	D13	63		448.4	3.93	1.49
	D16	100		366.8	3.48	1.22
	D19	137		359.9	3.19	1.20
	D22	114		360.2	3.85	1.20
	D25	104		361.7	6.42	1.21
	D29	92		356.6	4.88	1.19
	D32	26		353.5	2.93	1.18
소계	654		371.4	3.95	1.27	
SD400	D10	159	400	517.3	4.41	1.29
	D13	1070		517.5	3.27	1.29
	D16	248		498.9	8.15	1.45
	D19	305		516.4	3.84	1.29
	D22	809		444.8	2.80	1.11
	D25	267		501.9	2.94	1.25
	D29	132		493.2	2.88	1.23
	D32	82		492.3	3.23	1.23
소계	3072		493.7	3.94	1.27	

표 3. 강재의 기계적 성질

강종	EST(GPa)	fy(MPa)	$\epsilon_y$	$\epsilon_{ST}$
SM400	4.8	220~240	0.000114	0.017
SM490	3.8	300~320	0.000152	0.020
SM520	3.6	330~360	0.000171	0.020
SM570	3.1	430~460	0.000219	0.013

(2) 콘크리트의 응력-변형을 관계는 아래와 같은 CEB(1990) 모델을 적용하였다.

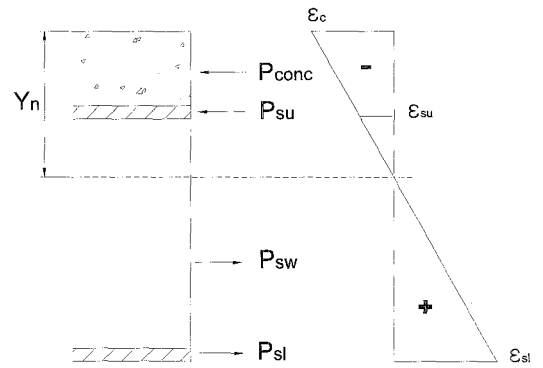
$$f_c = \frac{0.85f'_c(a - 206,000\epsilon_c)\epsilon_c}{1 + b\epsilon_c} \quad (1)$$

여기서,

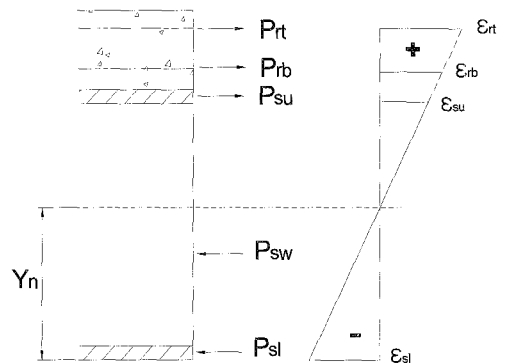
$$a = 39,000(0.85f'_c + 7.0)^{-0.953}, b = 65,600(0.85f'_c + 10.0)^{-1.985} - 850$$

이며 콘크리트의 응력  $f_c$ 와 28일 압축강도  $f'_c$ 의 단위는 MPa이며  $\epsilon_c$ 는 콘크리트 변형율을 나타낸다.

(3) 합성단면의 변형율은 파괴에 도달할 때까지 그림 2와 같은 선형 분포를 보인다.



(a) 정모멘트 단면



(b) 부모멘트 단면

그림 2. 단면의 작용력 및 변형율

(4) 부모멘트를 받는 합성단면에서 강거더의 좌굴은 방지되어 있다.

### 3.2 해석 알고리즘

모멘트-곡률 곡선을 구하여 극한휨저항강도를 평가하기 위한 재료 비선형 소성해석 프로그램의 중요 알고리즘은 강재와 콘크리트 슬래브 단면을 수평방향으로 여러 층(layer)으로 분할하여 주어진 곡률에 대응하는 변형율과 응력을 구하고 강거더 및 콘크리트 슬래브의 작용력에 대한 힘의 평형을 고려하여 중립축의 위치와 단면 휨모멘트를 구하는 것이다(Yakel et al. 2005). 단면을 구성하는 강재가 주어진 곡률에서 선형 탄성영역에 있을 수도 있고 곡률이 증가함에 따라 비탄성 소성영역에 머물 수도 있는데 비선형영역에서는 반복축차에 의해 주어진 곡률에 대응하는 변형율을 구해야 된다. 보다 구체적인 프로그램 알고리즘은 다음과 같다.

(1) 설계 파라미터(강재와 콘크리트 바닥판의 재료 및 기하학적 특성) 입력

- (2) 단면을 수평방향으로 매우 얇은 층(100~200개)으로 분할
- (3) 곡률 초기치  $\phi$  입력
- (4) 콘크리트 슬래브 상부변형을  $\epsilon_{max}$  가정 (부모멘트 휨저항강도 해석시 콘크리트 바닥판 무시)
- (5) 중립축 위치 산정  $y_c = \epsilon_{max}/\phi$
- (6) 선형 변형을 분포로 가정하여 각 층마다 변형을 산정
- (7) 각 재료의 응력-변형을 관계식으로부터 각 층의 응력 산정
- (8) 응력의 적분에 의한 전체 단면에 대한 작용력 산정
- (9) 단면력의 하중 평형조건 검토
- (10) 만일 평형조건을 만족하지 않으면 변형을  $\epsilon_{max}$  의 재가정
- (11) 힘의 평형조건을 만족할 때 까지 (5)-(10) 과정의 반복
- (12) 구해진 단면력을 이용하여 현재의 곡률에 대한 모멘트 값 산정
- (13) 곡률을 증가시키고 (4)-(12) 과정의 반복
- (14) 정모멘트 단면 해석시 콘크리트 슬래브 상부변형을  $\epsilon_{max}$  가 극한변형을 0.003에 도달한 경우 종료하며, 부모멘트 단면 해석시 철근이 항복응력에 도달하면 종료

#### 4. 단면 휨저항강도 통계 분석

##### 4.1 재료저항계수

LRFD 재료저항계수는 하중계수와 함께 주어진 목표신뢰도에 대하여 보정된다. FORM(First Order Reliability Method)에 의한 보정 시에 필요한 재료저항계수의 통계자료는 실제강도와 공칭강도간 비를 나타내는 편심계수( $\lambda$ )와 실제강도의 분산정도를 나타내는 변동계수( $\delta$ )이다. 단면의 저항강도( $R$ )는 다음 식과 같이 공칭휨강도( $R_n$ )에 재료( $M$ ), 구조물 제작( $F$ ) 및 해석( $P$ ) 오차에 기인한 불확실성 파라미터를 곱하여 다음 식과 같이 표현된다(Nowak 1999).

$$R = R_n M F P \quad (2)$$

따라서, 저항의 평균값( $\mu_R$ ) 및 변동계수( $\delta_R$ )는 다음 식으로 계산된다.

$$\mu_R = \mu_{R_n} \mu_M \mu_F \mu_P, \quad \delta_R = \sqrt{\delta_M^2 + \delta_F^2 + \delta_P^2} \quad (3)$$

본 연구에서는 재료의 불확실성에 기인한 편심계수와 변동계수( $\delta_M$ )를 구하였다. 단면의 공칭휨강도는 현 도로교설계기준

(2004)에 제시된 강재의 공칭항복응력을 적용하였다.

##### 4.2 해석대상 단면

단면 휨저항강도를 평가하기 위한 해석단면의 치수는 표 4에 요약된 바와 같은 정모멘트 단면 및 부모멘트 단면에 대하여 각각 3종류의 대표단면을 고려하였다. 표 4에서 S-1 단면은 지간이 비교적 짧고 거더수가 많은 교량을 목표로 한 단면이며, S-3 단면은 장경간 교량을 목표로 설정한 단면이며 S-2 단면은 중규모의 교량을 대상으로 설정한 단면으로 이들은 모멘트-곡률 곡선에서 강재의 연성거동이 확보되는 단면에 해당된다. 해석시 강재의  $E=210\text{GPa}$ , 콘크리트의  $f'_c=30\text{MPa}$ 로 가정하였다.

표 4. 모멘트 해석 대상단면 제원(단위: mm)

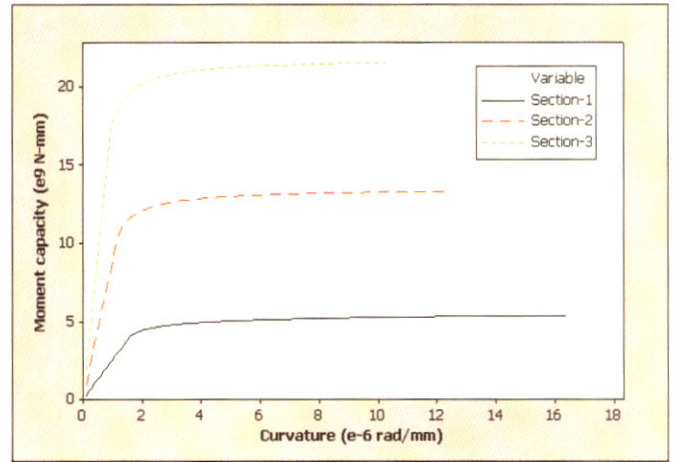
단면명	S-1	S-2	S-3
정모멘트 해석 단면 제원			
슬래브(mm)	2000x220	2200x230	2500x250
상부플랜지(mm)	400x20	500x30	600x30
복부판(mm)	1000x10	1500x12	2000x12
하부플랜지(mm)	400x20	500x30	600x30
부모멘트 해석 단면 제원			
슬래브(mm)	2000x220	2200x230	2500x250
$A_c(\text{mm}^2)$	440,000	506,000	625,000
상부 Rebar( $\text{mm}^2$ )	4,400	5,060	6,250
하부 Rebar( $\text{mm}^2$ )	2,200	2,530	3,125
상부플랜지(mm)	400x30	500x40	600x50
복부판(mm)	1000x10	1500x12	2000x12
하부플랜지(mm)	400x30	500x40	600x50
Rebar	SD300	SD400	SD400

#### 5. 해석결과 분석

정·부모멘트를 받는 표 4에 요약한 3개의 강함성 플레이트 거더 대표단면에 대해 재료비선형 소성해석을 수행하였다. 정모멘트를 받는 단면의 경우 실제 극한휨저항강도를 구하기 위해 최근 1년 이내에 국내에서 생산된 SS400, SM400, SM490, SM490Y, SM520, SM570을 사용하였으며 이들 강재의 총 표본수는 16,266개이다. 그림 3에는 표 4의 정모멘트를 받는 강함성거더 대표단면에 대한 SM400 및 SM490 강재의 공칭항복강도를 적용하여 구한 모멘트-곡률

곡선의 예를 나타내었다. 그림 3으로부터 정모멘트하 극한휨 저항강도 산정시 고려된 세 단면은 휨강도의 차이는 크지만 콘크리트 바닥판의 파괴 시까지 충분한 연성을 갖는 것을 관찰할 수 있다. 다른 강종을 적용하여 해석한 결과도 그림 3과 유사한 모멘트-곡률 곡선을 보이는 것으로 해석되었다. 표 5에는 S-1~S-3단면의 정모멘트하 공칭휨강도와 휨저항강도의 평균값, 변동계수( $\delta$ ) 및 편심계수 등의 통계값을 요약하였다. 편심계수는 실제 인장강도를 적용하여 구한 극한휨저항강도를 공칭휨강도로 나눈 값이다. 휨저항강도의 편심계수와 변동계수의 평균치는 각각 1.15~1.16 및 4.98~5.14%로 산정되었으며 세 종류의 단면간 이들 통계 계수의 차이가 매우 작은 것으로 분석되었다.

부모멘트를 받는 합성단면의 극한휨저항강도의 경우 콘크리트 바닥판의 하중저항능력은 무시하고 바닥판 철근과 강거더의 하중저항능력만을 고려하여 해석하였다. 단면을 구성하는 철근과 강재는 Monte Carlo 모의추정법으로 임의 추출하였다. 바닥판 철근의 경우 S-1단면은 SD300을 S-2와 S-3단면은 SD400을 적용하였으며 철근에 대해서는 각각 100개의 표본을 선택하였다. 강거더의 강재는 강종별 최대 200개의 표본을 선택하여 비선형 해석을 수행하였다. 그림 4에는 표 4의 부모멘트를 받는 강합성거더 대표단면에 대한 모멘트-곡률 곡선의 예를 나타내었다. 강거더는 SM400 및 SM490 강재를 적용하였으며, 강재의 공칭항복강도는 현 도로교설계기준의 SM490 강재에 대한 값으로 구한 것이다. 그림 4로부터 부모멘트를 받는 대상단면은 정모멘트를 받는 단면에 비해서 파괴 시까지 연성이 상대적으로 작은 것을 알 수 있다. 그림 4에서 S-1 단면은 강거더의 항복은 전혀 일어나지 않고 철근의 항복에 의한 단면 파괴가 예측되었으며, S-2 및 S-3 단면은 강거더가 항복을 일으킨 후 철근의 항복이 뒤따르는 것으로 해석되었다.



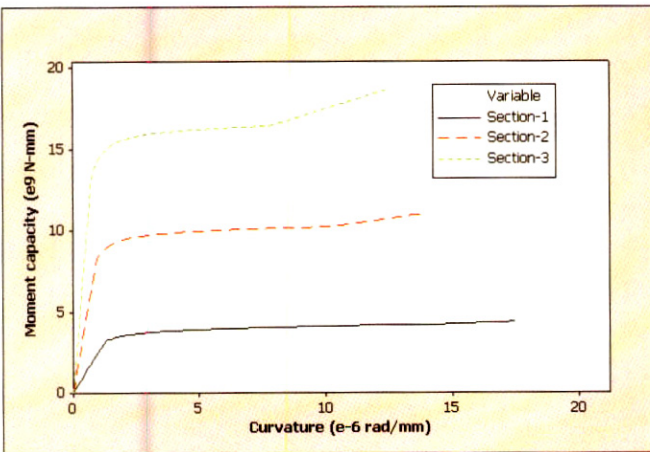
(b) SM490

그림 3. 정모멘트를 받는 강합성단면의 모멘트-곡률 곡선 예

표 5. 정모멘트 단면 휨저항강도( $\times 10^{10}$  N-mm) 통계치

강종	두께 (mm)	표본 수	S-1				S-2				S-3			
			공칭	평균	$\delta$ (%)	편심 계수	공칭	평균	$\delta$ (%)	편심 계수	공칭	평균	$\delta$ (%)	편심 계수
SS400	40이하	427	0.44	0.51	6.29	1.16	1.10	1.26	6.15	1.15	1.86	2.10	4.97	1.13
	41-100	37	0.41	0.47	4.27	1.12	1.05	1.17	3.75	1.12	1.79	1.98	3.28	1.10
SM400A	40이하	267	0.44	0.52	7.04	1.19	1.10	1.29	7.02	1.18	1.86	2.14	5.72	1.15
SM400B	40이하	144	0.44	0.50	4.28	1.14	1.10	1.24	3.89	1.13	1.86	2.07	3.06	1.11
SM490A	40이하	6133	0.54	0.62	7.20	1.16	1.33	1.55	7.57	1.17	2.20	2.52	7.63	1.14
	41-100	788	0.51	0.63	5.46	1.24	1.27	1.58	5.74	1.25	2.12	2.57	5.68	1.22
SM490B	40이하	4042	0.54	0.62	6.88	1.16	1.33	1.56	7.22	1.17	2.20	2.54	7.30	1.15
	41-100	392	0.51	0.63	5.24	1.23	1.27	1.57	5.53	1.24	2.12	2.56	5.46	1.21
SM490C	40이하	92	0.54	0.63	5.13	1.17	1.33	1.57	5.40	1.18	2.20	2.55	5.45	1.16
	41-100	53	0.51	0.64	5.25	1.25	1.27	1.60	5.51	1.26	2.12	2.60	5.56	1.23
SM490YA	40이하	185	0.59	0.68	3.38	1.15	1.48	1.71	3.53	1.16	2.40	2.79	3.53	1.16
	41-75	25	0.56	0.63	3.41	1.13	1.40	1.59	3.64	1.13	2.29	2.59	3.69	1.13
SM490YB	40이하	551	0.59	0.68	4.99	1.16	1.48	1.72	5.15	1.16	2.40	2.80	5.23	1.17
	41-75	143	0.56	0.64	3.75	1.13	1.40	1.59	3.99	1.14	2.29	2.59	4.01	1.13
	76-100	85	0.55	0.62	3.75	1.12	1.37	1.55	4.00	1.13	2.25	2.52	3.99	1.12
SMA490BP	40이하	274	0.59	0.69	8.23	1.17	1.48	1.75	8.41	1.19	2.40	2.86	8.55	1.19
SMA490BW	40이하	581	0.59	0.67	4.03	1.14	1.48	1.69	4.21	1.15	2.40	2.76	4.28	1.15
SM520B	40이하	1571	0.59	0.69	4.52	1.17	1.48	1.74	4.66	1.18	2.40	2.83	4.74	1.18
	41-75	24	0.56	0.64	3.04	1.13	1.40	1.60	3.20	1.14	2.29	2.60	3.26	1.13
	40이하	243	0.59	0.68	3.63	1.15	1.48	1.72	3.85	1.16	2.40	2.78	3.84	1.16
SM520C	41-75	41	0.56	0.63	3.89	1.12	1.40	1.59	4.15	1.13	2.29	2.58	4.17	1.12
	76-100	27	0.55	0.63	5.98	1.15	1.37	1.58	6.38	1.16	2.25	2.57	6.34	1.14
	40이하	92	0.73	0.82	5.31	1.13	1.84	2.10	5.49	1.15	3.01	3.38	5.10	1.13
SM570	41-75	49	0.71	0.79	4.71	1.11	1.77	2.00	4.87	1.13	2.91	3.23	4.64	1.11
총평균	-	-	-	-	4.99	1.16	-	-	5.14	1.16	-	-	4.98	1.15

표 6에는 해석대상 세 단면의 부모멘트하 공칭휨강도와 극한 휨저항강도의 평균값, 변동계수( $\delta$ ) 및 편심계수등의 통계값을 요약하였다. S-1단면의 변동계수 평균은 2.85%, 편심계수 평균은 1.22이며, S-2와 S-3단면의 변동계수 평균은 각각 5.62% 및 5.54%이며, 편심계수의 평균은 두 단면 모두 1.28로 산정되었다. 표 6으로부터 S-1단면은 S-2나 S-3 단면 보다 변동계수와 편심계수가 작은 것을 알 수 있다. 이는 강재 보다 항복강도가 작은 SD300을 사용하여 강재의 항복강



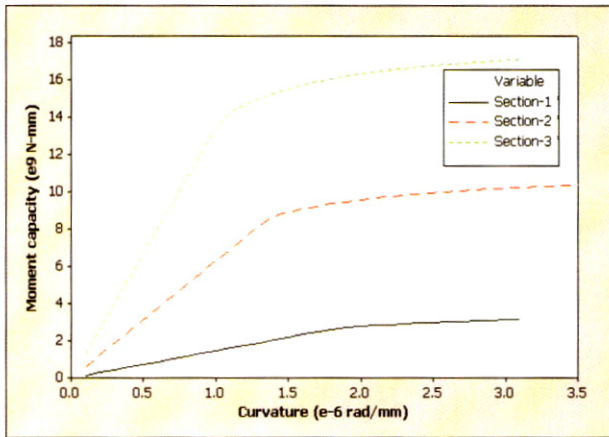
(a) SM400

도가 상대적으로 작은 SS400과 SM400을 제외한 나머지 강재에서는 강재의 항복강도가 철근의 항복강도 보다 상당히 커 강재가 항복응력에 도달하기 전에 철근이 먼저 항복하기 때문인 것으로 분석된다.

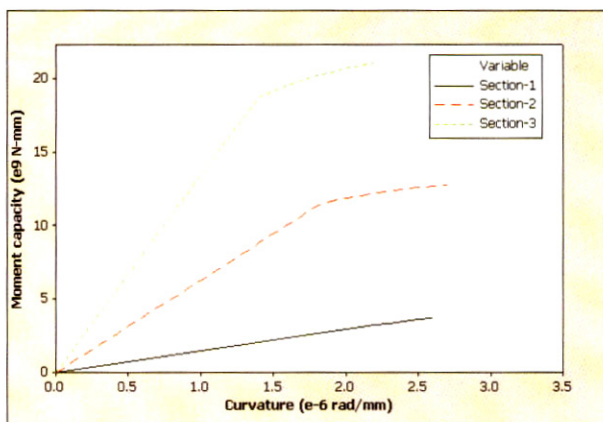
이상의 분석결과를 요약하면 정모멘트를 받는 강합성단면의 경우 극한휨저항강도의 평균 편심계수는 1.16, 평균 변동계수는 5.04%이며, 부모멘트를 받는 경우에는 극한휨저항강도의 평균 편심계수는 1.26, 평균 변동계수는 4.67%이다. AASHTO-LRFD 보정에서는 재료의 변동성에 기인한 합성단면의 평균 편심계수는 1.07, 변동계수는 8%를 적용한 바 있다(Nowak 1999). 국산 강재를 사용한 합성단면의 편심계수가 AASHTO-LRFD 보정에 적용한 값보다 큰 이유는 국산 강재의 항복강도에 대한 편심계수가 1.20으로 AASHTO-LRFD의 1.05 보다 크기 때문이다. 휨저항강도에 대한 변동계수의 경우에는 AASHTO-LRFD에 적용한 강재는 10%인 반면에 국산 강재는 5.83%로 작기 때문에 합성단면에 대한 변동계수도 국산 강재를 적용한 단면이 5% 내외로 AASHTO-LRFD의 8% 보다 작게 산정된 것이다.

표 6. 부모멘트 단면 휨저항강도( $\times 10^{10}$  N-mm) 통계치

강종	두께 (mm)	표본수		S-1				S-2				S-3				
		강재	철근	공칭	평균	$\delta$ (%)	편심 계수	공칭	평균	$\delta$ (%)	편심 계수	공칭	평균	$\delta$ (%)	편심 계수	
SS400	40이하	200	100	20000	0.31	0.39	4.30	1.25	1.04	1.35	6.60	1.30	1.71	2.22	6.69	1.30
	41-100	37	100	3700	0.30	0.36	4.05	1.22	0.97	1.21	5.51	1.25	1.59	1.96	5.54	1.25
SM400A	40이하	200	100	20000	0.31	0.40	4.40	1.27	1.04	1.38	6.81	1.33	1.71	2.71	6.91	1.59
SM400B	40이하	140	100	14400	0.31	0.38	3.39	1.22	1.04	1.30	4.85	2.25	1.71	2.13	4.88	1.25
SM490A	40이하	200	100	20000	0.37	0.43	2.77	1.18	1.28	1.59	6.55	1.24	2.11	2.61	6.61	1.24
	41-100	200	100	20000	0.36	0.44	3.18	1.22	1.22	1.62	6.19	1.33	2.03	2.67	6.19	1.32
SM490B	40이하	200	100	20000	0.37	0.43	2.60	1.18	1.28	1.60	6.21	1.25	2.11	2.63	6.24	1.25
	41-100	200	100	20000	0.36	0.44	2.66	1.23	1.22	1.63	5.39	1.33	2.03	2.69	5.33	1.33
SM490C	40이하	92	100	9200	0.37	0.44	2.55	1.19	1.28	1.62	5.32	1.27	2.11	2.67	5.25	1.27
	41-100	53	100	5300	0.36	0.44	2.56	1.23	1.22	1.64	5.42	1.35	2.03	2.71	5.36	1.34
SM490YA	40이하	185	100	18500	0.36	0.45	2.60	1.22	1.36	1.74	4.78	1.28	2.26	2.87	4.65	1.27
	41-75	25	100	2500	0.36	0.44	2.28	1.21	1.32	1.64	4.33	1.24	2.19	2.71	4.16	1.23
SM490YB	40이하	200	100	2000	0.36	0.45	2.64	1.22	1.36	1.74	5.39	1.28	2.26	2.88	5.33	1.27
	41-75	145	100	14500	0.36	0.44	2.41	1.21	1.32	1.64	4.60	1.25	2.19	2.71	4.45	1.24
SMA490BP	40이하	200	100	20000	0.36	0.44	2.67	1.22	1.36	1.77	7.42	1.30	2.26	2.93	7.50	1.29
	40이하	200	100	20000	0.36	0.44	2.57	1.22	1.36	1.71	4.92	1.26	2.26	2.83	4.81	1.25
SM520B	40이하	200	100	20000	0.36	0.45	2.67	1.22	1.36	1.76	5.61	1.29	2.26	2.91	5.56	1.29
	41-75	24	100	2400	0.36	0.44	2.15	1.21	1.32	1.65	4.14	1.25	2.19	2.71	3.93	1.24
SM520C	40이하	200	100	20000	0.36	0.45	2.62	1.22	1.36	1.73	4.86	1.27	2.26	2.86	4.74	1.26
	41-75	51	100	5100	0.36	0.44	2.45	1.20	1.32	1.63	4.86	1.23	2.19	2.68	4.75	1.22
SM570	40이하	92	100	9200	0.36	0.45	2.74	1.22	1.45	1.96	7.77	1.32	2.42	3.26	7.28	1.35
	41-75	49	100	4900	0.36	0.45	2.74	1.22	1.45	1.91	6.69	1.32	2.42	3.18	6.44	1.31
총평균	-	-	-	-	-	-	2.85	1.22	-	-	5.62	1.28	-	-	5.54	1.28



(a) SM400



(b) SM490

그림 4. 부모멘트를 받는 강합성단면의 모멘트-곡률 곡선 예

## 6. 결론

국산 강재(총표본수 16,266개)의 기계적 특성을 반영하여 정·부모멘트를 받는 강합성 플레이트 거더 대표단면에 대해 재료 비선형 소성해석을 수행하고 강재 항복강도의 변동성에 기인한 휨저항강도의 주요 통계 파라미터인 편심계수와 변동계수를 구하였다. 철강사의 Mill-sheet에 근거하여 산정한 국산 강재의 항복강도 편심계수는 1.14~1.31(평균 1.20)이며 변동계수는 2.6~9.7%(평균 5.83%)로 분석되었다. 정모멘트를 받는 강합성단면의 경우 휨저항강도의 평균 편심계수는 1.16, 평균 변동계수는 5.04%로 계산되었다. 부모멘트를 받는 경우에는 휨저항강도의 평균 편심계수는 1.26, 평균 변동계수는 4.67%로 산정되었다. 이와 같은 통계치는 AASHTO-LRFD 보정에서 적용한 편심계수 1.07 보다는 크고 변동계수 8% 보다 작게 산정된 것으로 합성단면 휨저항강도만을 고려하면 국산 강재를 적용한 단면의 신뢰도지수가 AASHTO-LRFD 경우 보다 크게 평가될 것으로 예상된다. 향후, 재료저항계수는 목표신뢰도지수 및 하중계수와 연계된 보정(calibration)을 통하여 본 논문에서 제시한 바와 같은 저항통계를 적용하여 결정될 수 있을 것이다.

### 감사의 글

이 연구는 교량설계핵심기술연구단을 통하여 지원된 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업에 의하여 수행되었습니다. 연구 지원에 감사 드립니다. 아울러, 강제자료에 적극 협조해 주신 POSCO 토목 수요개발팀 관계자 여러분께도 깊이 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

건설교통부, (2005) 도로교설계기준, 한국도로교통협회.  
 AASHTO, (1996) AASHTO LRFD Bridge Design Specifications.  
 Comite Euro International du Beton, (1990) CEB-FIB Model Code, Thomas Telford, Laussance, Switzerland.  
 Ellingwood, B., Galambos, T. V., MacGregor, J. G., and Cornell, C. A. (1980) Development of a Probability Based Load Criterion for American National Standard A58, National Bureau of Standards, NBS Special Publication 577, Washington, D.C.

Kennedy, D. J. L. and Baker, K. A. (1984) Resistance factors for steel highway bridges, Can. J. Civil Engrg., Vol. 12, No. 2, pp. 324-334.  
 Nowak, A. S. (1990) Calibration of Load and Resistance Factors for OHBDC, Research Report UMCE 90-06, Univ. of Michigan, USA.  
 Nowak, A. S. (1999) Calibration of LRFD Bridge Design Code, Report 368, Transportation Research Board, National Academy Press, Washington, D.C.  
 OHBDC, (1991) Ontario highway bridge design code. Ontario Ministry of Transportation and Communications, Downsview, Ont.  
 Tabsh, S. W. and Nowak, A. S. (1991) Reliability of Highway Girder Bridges, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 117, No. 8, pp. 2372-2337.  
 Yakel, A. J. and Azizinamini, A. (2005) Improved Moment Strength Prediction of Composite Steel Plate Girders in Positive Bending, Journal of Bridge Engineering, ASCE, Vol. 10, No. 1, pp. 28-38.

(접수일자 : 2006. 9. 14 / 심사일 2006. 11. 6 / 심사완료일 2007. 2. 13)